

# Лекция 11. Экологические аспекты эксплуатации АЭС

## 11.1. Выбор места для расположения АЭС

При выборе места расположения ядерных реакторов в первую очередь учитываются санитарно-гигиенические требования, обеспечивающие предупреждение вредного влияния АС на окружающую среду и население. Согласно нормативным требованиям предпочтение участкам:

- расположенным с подветренной стороны по отношению к населенным пунктам и поселку АЭС, в малозаселенных местностях с ровным рельефом поверхности земли (должна учитываться годовая роза ветров);
- с глубоким стоянием грунтовых вод, чтобы наивысший уровень этих вод находился не менее чем на 1,5 м ниже отметки пола подземных сооружений, в которых, возможно, будут располагаться радиоактивные жидкости;
- в хорошо продуваемом месте.

Перед выбором места необходимо подробно исследовать гидрометеорологические и санитарные условия района. Особое внимание должно быть обращено на условия рассеяния примесей в атмосфере.

Согласно СПАС-99, при выборе площадки должны соблюдаться «Требования к размещению АС», в которых указаны расстояния от городов и крупных населенных пунктов с учетом радиационных последствий запроектных гипотетических аварий, которые превосходят Максимальные проектные аварии (МПА). При этом доза внешнего и внутреннего облучения населения не должна превышать норм, установленных действующими правилами радиационной безопасности НРБ-99 – 0,1 мЗв в год. Предельная электрическая мощность АС на одной площадке ограничивается для АЭС – 8 ГВт, АТЭЦ – 4 ГВт и АСТ – 2 ГВт.

Плотность населения, проживающего в зоне радиусом 25 км вокруг АЭС и АТЭЦ, включая контингент строителей и эксплуатационщиков, не должна превышать 100 чел/км<sup>2</sup>. При этом должна быть предусмотрена дорожная сеть и транспортные средства, позволяющие обеспечить в случае необходимости эвакуацию населения из загрязненных районов указанной зоны в течение 4 ч. Местоположение АС должно быть согласовано с перспективным планом развития района. Район размещения должен допускать возможность организации санитарно-защитной зоны вокруг реактора. Санитарно - защитная зона - территория вокруг источника ионизирующего излучения, на которой уровень облучения людей в условиях нормальной эксплуатации данного источника может превысить установленный предел дозы облучения населения.

## *1.1. Экологический контроль за деятельностью АЭС*

АЭС, как и другие промышленные объекты, является источником техногенного загрязнения окружающей среды. Система контроля над состоянием окружающей природной среды в районе расположения атомной станции создается для обеспечения надзора за безопасностью ее работы. Она должна обеспечивать охрану здоровья персонала, населения и выполнение природоохранного законодательства в периоды строительства, эксплуатации и снятия с эксплуатации АЭС, как в нормальном, так и в аварийном режимах, т.е. обеспечивать сохранение экологически допустимых уровней загрязнения, гарантирующих безопасность персонала, населения и окружающей среды.

В отношении радиоактивного загрязнения основное назначение системы контроля – достоверная и оперативная оценка радиационной обстановки в районе АЭС с одновременным обеспечением принятия решений по локализации загрязнений и полному или максимально возможному снижению последствий радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду.

На стадии выбора строительной площадки и проектирования АЭС наблюдения за состоянием природной среды и сельскохозяйственных угодий проводятся с целью обеспечения исходными данными и информацией, необходимыми для разработки проекта, а также с целью получения «фоновых» данных о состоянии объектов природной среды и сельскохозяйственных угодий, как основы для последующих оценок влияния действующей АЭС на окружающую среду. Все эти данные используются для разработки раздела проекта, посвященного Оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС). Этот раздел готовится в качестве самостоятельного документа, имеющий свой уровень согласования с местными и государственными органами санитарного надзора и экологической экспертизы. Кроме того, на различных этапах создания ОВОС необходимо проводить общественные слушания. ОВОС разрабатывается с учетом всех стадий функционирования АЭС – строительство, эксплуатация и снятие с эксплуатации.

На стадии эксплуатации или вывода АЭС из эксплуатации в результате выработки ресурса целью контроля является получение сведений о воздействии на окружающую среду всех вредных факторов. Отдельно исследуются воздушное загрязнение, загрязнение водной среды, радиационные, шумовые, электромагнитные, вибрационные, тепловые и прочие факторы. Объем данных должен быть достаточным для разработки рекомендаций по оптимизации взаимоотношений системы АЭС – окружающая среда с целью сохранить нормальные условия жизнеобитания и природную среду.

Таким образом, экологический контроль над деятельностью АЭС является комплексной задачей включающей в себя ряд подзадач:

- контроль над соблюдением требований безопасности на самой станции;
- контроль над выбросами и вредными факторами воздействия на человека и окружающую среду;
- контроль над состоянием окружающей среды.

Основные задачи радиационного контроля за состоянием окружающей среды в районе расположения АЭС (радиационного мониторинга):

- непрерывные систематические наблюдения за уровнем радиоактивного загрязнения объектов природной среды, причем чувствительность приборов должна позволять работать в области фоновых величин излучений;
- обнаружение радиоактивного загрязнения местности и отдельных объектов наблюдения;
- оценка уровней и масштабов радиоактивного загрязнения объектов наблюдения, определение изотопного состава загрязнения;
- контроль за динамикой изменения уровней радиоактивного загрязнения объектов наблюдения.
- оценка радиационной опасности, возникшей в результате радиоактивного загрязнения. Выявление приоритетности изотопов в составе загрязнения различных объектов природной среды с точки зрения их опасности.
- прогноз изменений радиационной обстановки и последствий радиоактивного загрязнения;
- сбор, обобщение и передача заинтересованным органам и ведомствам информации о радиационной обстановке и состоянии окружающей среды в районе расположения АЭС и о прогнозе ее изменения.

Радиационный и другие виды мониторинга за деятельностью АЭС ведутся различными организациями и ведомствами. Во-первых, это специально действующие службы на самих атомных станциях. В их обязанности входит как внутренний, так и внешний мониторинг радиационного воздействия, контроль над выбросами, контроль над содержанием радионуклидов в технологических трактах (КГО). По результатам такого контроля может быть принято решение о приостановке работы реактора. Проведение дезактивационных мероприятий и т.п. Во-вторых – органы санитарно-эпидемиологического надзора представляющие Министерство Здравоохранения. Они проводят комплексные проверки предприятий на предмет наличия и уровня вредных факторов. Ими же ведется постоянный контроль над содержанием радионуклидов в пищевых продуктах, продуктах животноводства и растениеводства, почве, воде и воздухе. В-третьих, экологические службы – ведут контроль над состоянием и наличием вредных веществ и радионуклидов в окружающей среде. Взаимодействуют с АЭС. В-четвертых – Госкомгидромет – обеспечивает оперативное обнаружение радиоактивного загрязнения окружающей среды на территории всей страны как отечественными, так и зарубежными АЭС.

Контролирует трансграничный перенос радионуклидов, обеспечивает гидрометеорологической информацией и прогнозами заинтересованные организации. В-пятых – Минсельхоз – обеспечивает контроль за радионуклидным загрязнением сельскохозяйственных угодий и содержанием радионуклидов в продуктах животноводства и растениеводства.

Конкретные программы радиационного контроля разрабатываются каждым ведомством самостоятельно с учетом местных особенностей для каждой АЭС в отдельности.

Общими для всех ведомств, принимающих участие в контроле за состоянием природной среды в районе расположения АЭС, являются следующие задачи:

- разработка рекомендаций для директивных органов по проведению народнохозяйственных мероприятий при опасной радиационной обстановке;
- оценка эффективности принятых защитных мер в случае радиационной аварии и создание основы для уточнения этих защитных мер при необходимости, определение радиационной нагрузки на население и экосистему;
- создание банка данных с результатами контроля в качестве основы для оценки воздействия АЭС на состояние окружающей среды;
- организация взаимодействия ведомственных служб радиационного контроля
- унификация методик радиационного контроля объектов, наблюдаемых разными ведомствами.

### ***11.2. Источники поступления радиоактивных продуктов АЭС в окружающую среду***

В период эксплуатации АЭС в процессе работы реактора в ядерном топливе со временем накапливается большое количество радиоактивных продуктов деления, представляющих потенциальную опасность для персонала, жителей прилегающих населенных пунктов и окружающей среды. Например, суммарная активность продуктов деления  $^{235}\text{U}$  на конец 3-годовой работы реактора мощностью 1 ГВт (тепл.) составляет  $4,4 \cdot 10^9$  Ки. Эта активность должна удерживаться внутри тепловыделяющих элементов. Регламентом допускается эксплуатация реакторов типа ВВЭР при 1%-ной газовой негерметичности оболочек твэлов или 0,1% от числа твэлов с частичной негерметичностью, когда возможен прямой контакт сердечника твэла с теплоносителем. Для реакторов типа РБМК эти коэффициенты на порядок меньше.

Очевидно, что часть продуктов деления может попадать в теплоноситель. При этом концентрация радиоактивных продуктов в теплоносителе не должна достигать контрольного уровня 0,1 Ки/л (для ВВЭР).

При эксплуатации АЭС в нормальном режиме обеспечена локализация основного количества радиоактивных продуктов в реакторной установке, системах очистки теплоносителя (например, спецводоочистки) и газов (спецгазоочистки). В частности, предусмотрена высокая герметичность парогенератора и трубопроводов первого контура реактора, вследствие чего радиоактивные продукты локализуются внутри него и концентрируются на ионообменных фильтрах при переработке теплоносителя. Далее пульпа, содержащая высокоактивную ионообменную смолу, сбрасывается в хранилище высокоактивных жидких отходов, выдерживается там в течение определенного времени для распада короткоживущих изотопов, переводится в твердое состояние и поступает на захоронение в хранилище твердых отходов (могильники).

Газоаэрозольные выбросы перед поступлением в атмосферу очищаются от паров воды и водорода, на специальных фильтрах – от радиоактивных аэрозолей и на угольных фильтрах – от изотопов йода. Устройства систем удаления и очистки отходов могут варьироваться для различных АЭС.

В результате нейтронной активации кроме продуктов деления образуется наведенная активность элементов конструкций реактора и теплоносителя, которая с течением времени может стать значительной. Таким образом, на АЭС имеется целый ряд узлов технологической схемы, в которых концентрируется большое количество радиоактивных продуктов. В случае разрушения этих узлов в результате аварий во внешнюю среду могут поступить радиоизотопы в количестве, определяемом как характером разрушения, так и длительностью работы АЭС.

При реальной эксплуатации АЭС в безаварийном режиме всегда существуют неплотности и дефекты в системе трубопроводов. В результате чего возникают протечки теплоносителя, как между контурами, так и во внешнюю среду. Так, допустимые протечки теплоносителя первого контура ВВЭР-440 составляют примерно 240 кг/ч, а фактические обычно находятся в пределах 5-50 кг/ч. При испарении теплоносителя в помещения АЭС поступают газообразные и аэрозольные радиоактивные продукты. При ремонтных работах, особенно сопровождающихся вскрытием первого контура, также происходит загрязнение воздуха, и поверхностное загрязнение помещений и оборудования. Дезактивация загрязненных поверхностей приводит к образованию жидких или аэрозольных радиоактивных отходов.

Загрязненный воздух из помещений через систему вентиляции выбрасывается в окружающую среду, а жидкие отходы собираются и подвергаются концентрированию. Газоаэрозольные выбросы АЭС в атмосферу производятся в основном после очистки через высокую трубу вентиляционного центра, способствующую лучшему рассеиванию радиоактивных продуктов в воздухе и уменьшению их концентрации в приземной атмосфере. Выбросы состоят главным образом из инертных

радиоактивных газов, а также содержат незначительные количества продуктов деления ядерного топлива, концентрация которых за пределами санитарно-защитной зоны обычно ниже глобального фонового уровня, обусловленного испытаниями ядерного оружия. В выбросах АЭС эксплуатирующихся много лет возможно присутствие продуктов активации (например,  $^{60}\text{Co}$ ), являющихся следствием коррозии металла.

По изотопному составу радиоактивные отходы АЭС представляют собой смесь различных радионуклидов, как продуктов деления, так и образующихся в результате активации нейтронными потоками. При делении любого типа ядерного горючего образуется около 200 различных радионуклидов. Большой выход при делении имеют радиоизотопы инертных газов криптона и ксенона, а среди радионуклидов, представляющих опасность внутреннего облучения – изотопы йода, цезия, стронция, циркония, бария, рутения. При надлежащей герметичности оболочек твэлов образующиеся в них осколочные продукты удерживаются в топливе. Однако даже при незначительных дефектах оболочек продукты деления (в первую очередь газообразные и летучие изотопы криптона, ксенона и йода) проникают в теплоноситель и далее в вентиляционные и канализационные системы. Источником загрязнения теплоносителя являются оболочки твэлов и остаточное загрязнение поверхности твэлов делящимся веществом, возникающее при изготовлении тепловыделяющих элементов.

Наведенная активность возникает в тех местах реактора, в которых имеются потоки нейтронов, исходящие из активной зоны: в теплоносителе и воздушных пространствах, деталях первого контура и корпуса реактора. Среди продуктов активации в водо-водяных и водографитовых реакторах наибольшее значение имеют радионуклиды, образующиеся в теплоносителе. Наведенная активность воды первого контура при работе реактора обусловлена активацией растворенных в воде веществ и продуктов коррозии. Это  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{58, 60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  и другие радионуклиды. Из продуктов активации газов наибольшее значение имеет  $^{41}\text{Ar}$ .

Газоаэрозольные отходы формируются при вентиляции монтажных пространств, помещений насосов первого контура, емкостей, содержащих жидкие отходы, и других помещений, в которых могут быть радиоактивные вещества, а также за счет выбросов эжекторных турбин. При этом в воздух поступают в основном газообразные и летучие радиоизотопы и в меньшей степени – нелетучие вещества в виде аэрозолей.

Основными по активности составляющими воздушного выброса ядерных реакторов, являются радиоизотопы инертных газов -  $^{41}\text{Ar}$  – и осколочные изотопы криптона и ксенона, основными из которых являются  $^{133}\text{Xe}$  и  $^{85}\text{Kr}$ . В газообразной фазе выбросов присутствуют также тритий и  $^{14}\text{C}$ . Радиоизотопы йода (в основном  $^{131}\text{I}$ ) присутствуют в воздушном выбросе, как в виде аэрозоля, так и в газообразной фазе, причем активность газообразной фазы радиойода может в десятки раз превышать активность в аэрозоле. Основная доля активности аэрозолей, поступающих в атмосферу, приходится

на короткоживущие продукты распада криптона и ксенона:  $^{88}\text{Rb}$  ( $T_{1/2}=18$  мин) и  $^{138}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}=33$  мин). Из долгоживущих продуктов наведенной активности основными являются  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{51}\text{Cr}$  и др. Из продуктов деления в аэрозольной фазе выброса наиболее вероятно присутствие  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ . Количество  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{89,90}\text{Sr}$  в выбросах мало, однако вследствие их биологической опасности за поступлением этих нуклидов во внешнюю среду устанавливается постоянный контроль. В жидкие сбросы АЭС радиоактивные продукты могут попасть при наличии протечек с водой, охлаждающей конденсаторы турбин, а также с водой промконтура и в виде сбросов малоактивных дебалансных вод, прошедших глубокую очистку от радиоактивного загрязнения.

Наибольший вклад в загрязнение водоемов-охладителей вносит тритий. На АЭС с реакторами типа ВВЭР его годовые сбросы с жидкими стоками составляют приблизительно 2 Ки/(МВт·год), а на АЭС с реакторами типа РБМК – около 0,1 Ки/(МВт·год). Кроме того, в водоемы поступает незначительное количество  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{58,60}\text{Co}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ , а также  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Fe}$  и  $^{131}\text{I}$ . Количество изотопов  $^{89,90}\text{Sr}$  в жидких сбросах очень мало, после трития основная часть активности сбросов определяется изотопами  $^{134,137}\text{Cs}$ , в меньшей мере  $^{131}\text{I}$  и  $^{58,60}\text{Co}$ . Возможным источником поступления изотопов в окружающую среду являются хранилища жидких радиоактивных отходов, преобладающая доля активности которых приходится на долгоживущий изотоп  $^{137}\text{Cs}$  (до 95%).

Твердыми радиоактивными отходами могут быть различного рода материалы из активной зоны реакторов, первого контура, демонтированное оборудование и коммуникации контуров с активной средой, отработанные фильтры очистных установок, загрязненные инструменты, приборы, обтирочные материал, спецодежда, средства индивидуальной защиты и другие предметы. Твердые отходы направляются на захоронение в специально оборудованные хранилища.

При нормальной работе АЭС скорость выброса радиоактивных продуктов в окружающую среду тщательно контролируется. Содержащиеся в воздухе радиоактивные нуклиды благородных газов криптона, ксенона, радона, трития,  $^{14}\text{C}$ , а также присутствие аэрозолей топлива и продуктов деления определяют наличие ионизирующего излучения в воздухе. Жидкие радиоактивные выбросы, попадающие в реки, большие озера или океан, содержат тритий, продукты деления и другие вещества. При работе АЭС человек может подвергаться следующим воздействиям ионизирующего излучения:

- внешнему  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучению при распаде газообразных радиоактивных нуклидов, содержащихся в атмосфере или в воде;
- облучению при распаде осевших на землю радиоактивных аэрозольных частиц;
- внутреннему облучению в результате потребления загрязненной радиоактивными нуклидами пищи или воды.

Скорость и уровень выхода радиоактивных нуклидов в окружающую среду зависят от механизмов генерации и удержания этих нуклидов, которые в свою очередь, определяются конструкцией активной зоны топлива и реактора, а также защитных устройств технологического оборудования. Совокупность взаимосвязанных герметизированных объемов (так называемых барьеров безопасности с низким уровнем утечки) и другие технические меры позволяют обеспечить очень высокие коэффициенты удержания радиоактивных веществ, или, что то же самое, низкие коэффициенты радиоактивных выбросов в окружающую среду.

Газообразные радионуклиды и аэрозоли, выходящие в окружающую среду непосредственно или под контролем через вентиляционную трубу, смешиваются с атмосферным воздухом и разбавляются в нем. Степень разбавления зависит от высоты вентиляционной трубы, перемешиваемости воздушных слоев (атмосферных условий) и расстояния от АЭС. Радионуклиды также выпадают на землю в виде сухих и мокрых осадков. Концентрация жидких радиоактивных выбросов зависит от степени разбавления их в воде, т.е. количественного соотношения между выбросами и окружающей водой.

Результаты государственного экологического мониторинга АЭС являются открытыми и публикуются в информационных источниках. На рис.17 показаны результаты контроля за выбросами радиоактивных веществ в окружающую среду для АЭС различного типа.

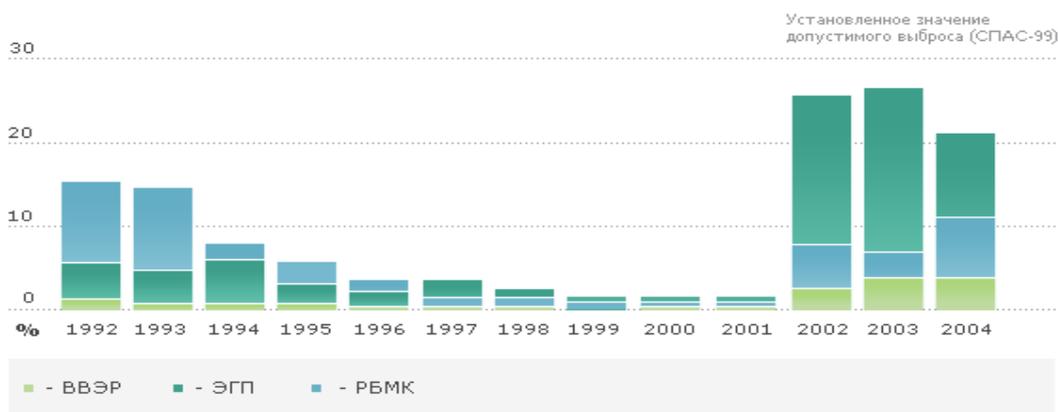


Рисунок 17. Радиационные выбросы АЭС

### 11.3. Основные радионуклиды АЭС и их воздействие на человека

Среди большого перечня искусственных радионуклидов, образующихся при работе ядерного реактора, важнейшее значение имеет группа биологически активных радионуклидов. Разные по своим дозиметрическим характеристикам эти радионуклиды имеют одну общую способность- все они являются «двойниками» или близкими аналогами химических элементов, выполняющих важные биологические функции в живых организмах. Так литий и углерод 14 могут входить в состав любых биомолекул, в том числе

генетических структур; стронций-90 является близким аналогом кальция и входит в состав костных тканей; радиоцезий – химический аналог калия и включается в мышечные ткани; йод необходим для функционирования щитовидной железы; фосфор играет важную роль в энергетике клеток; железо, кобальт, цинк и их радионуклиды входят в состав ферментов(катализаторов биохимических реакций), например, железо входит в состав гемоглобина, кобальт – в состав витамина В<sub>12</sub>.

В природных условиях целый ряд элементов, не обходимых живым организмам, присутствует в очень малых количествах, в связи с этим организмы обладают способностью активно захватывать, накапливать в клетках объем элементов, значительно больший, чем в окружающей среде. Коэффициенты накопления растениями и животными биогенных элементов относительно их содержания в окружающей среде могут быть очень большими и достигать порядка 10<sup>5</sup>. Радионуклиды – аналоги биологических элементов – активно ассимилируются в организмах растений, животных и человека, включаются в биологические структуры, концентрируются в отдельных органах или тканях.

Радионуклиды инкорпорированные в организме, создают внутреннее клиническое облучение, практически полностью поглощаемое тканями. По сочетанию дозиметрических и биологических свойств радионуклиды делять на 4 класса опасности:

Группа А – радионуклиды с особо высокой токсичностью.

Группа Б – радионуклиды с высокой токсичностью.

Группа В – радионуклиды со средней токсичностью.

Группа Г – радионуклиды с малой радиотоксичностью.

### *11.3.1. Тритий, углерод-14 и криптон*

**Тритий** ( $T_{1/2}=12,4$  года) образуется в активной зоне реактора в результате тройного деления: в среднем примерно на 10<sup>4</sup> делений <sup>235</sup>U всего одно происходит с образованием трития. Приблизительно в 2 раза больше образуется трития при делении <sup>239</sup>Pu. Кроме того, тритий образуется в теплоносителе в результате захвата нейтронов ядрами дейтерия, содержащегося в воде в количестве 0,015%. Тритий также образуется при взаимодействии нейтронов с бором, входящим в состав органов регулирования. Из реактора тритий выделяется или в виде содержащего тритий газа (НТ), или в виде содержащий тритий воды (НТО) и попадает в атмосферу, или водоемы. Газообразный тритий очень быстро окисляется и переходит в НТО. В конечном счете, любой утекающий самопроизвольно или сбрасываемый под контролем тритий оказывается в виде содержащей тритий воды. В растениях и организмах животных устанавливается соотношение концентраций НТО и Н<sub>2</sub>O, близкое к существующему в окружающей среде. Радиационное воздействие трития является следствием потребления человеком продуктов питания и питьевой воды. Кроме того, НТО может попасть в организм человека при вдыхании, а также через

кожные покров. При наличии трития весь организм человека подвергается воздействию  $\beta$ -излучения с максимальной энергией 18 кэВ (Мягкий  $\beta$ -излучатель). *Группа опасности Г.*

$^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2}=5770$  лет) образуется в активной зоне реактора в результате реакций  $(n, p)$  на  $^{14}\text{N}$ ,  $(n, \alpha)$  на  $^{17}\text{O}$  и  $(n, \gamma)$  на  $^{13}\text{C}$ . Нуклид  $^{14}\text{C}$  испускает  $\beta$ -излучение с максимальной энергией 16 эВ. В окружающей среде  $^{14}\text{C}$  окисляется до  $^{14}\text{CO}_2$ . В растениях и животных соотношение  $^{14}\text{CO}_2$  и  $^{12}\text{CO}_2$  может быть очень близким к тому, которое существует в атмосфере. Действие ионизирующего излучения на человека обусловлено главным образом потреблением продуктов питания (молока, овощей, мяса). Ингаляционное облучение, а также внешнее облучение окружающей среды в случае  $^{14}\text{C}$  играют второстепенную роль. *Группа опасности Г.*

$^{85}\text{Kr}$  ( $T_{1/2}=10,7$  года) является продуктом деления тяжелых ядер. После разбавления отходящими в вентиляционную трубу газами он выбрасывается непосредственно в атмосферу. Приблизительно 99,6 % ядер  $^{85}\text{Kr}$  распадаются с испусканием только  $\beta$ -излучения с максимальной энергией 0,67 МэВ и всего 0,4% ядер  $^{85}\text{Kr}$  – с испусканием  $\beta$ -излучения (позитрон) с максимальной 0,16 МэВ с сопутствующим гамма-излучением с энергией 0,511 МэВ. Концентрация содержащегося в атмосфере  $^{85}\text{Kr}$  не может быть уменьшена за счет осаждения или вымывания:  $^{85}\text{Kr}$  практически нерастворим в воде. Радиологическое воздействие  $^{85}\text{Kr}$  на человека происходит главным образом за счет облучения кожного покрова. Вдыхание  $^{85}\text{Kr}$  играет меньшую роль. Накопление  $^{85}\text{Kr}$  в атмосфере представляет также потенциальную угрозу существенного изменения электропроводности воздуха, что может вести к глобальным экологическим последствиям. *Группа опасности Г.*

### 11.3.2. Радионуклиды йода

Образующиеся в реакторе короткоживущие радионуклиды йода  $^{131}\text{I}$  ( $T_{1/2}=8$  суток) и  $^{133}\text{I}$  ( $T_{1/2}=20$  часов) являются продуктами деления с большим выходом. Радионуклиды йода, выбрасываемые в атмосферу из реактора, частично находятся в элементарной форме, а частично в виде органических соединений (метилюиды). Содержащийся в атмосфере йод осаждается и активно переходит в растительность (траву и овощи). Если радиоактивный йод попадает в сбросные воды, он может накапливаться в рыбе и водных растениях. Пути проникновения в организм человека радиоактивного йода различны: вместе с вдыхаемым воздухом, при потреблении овощей, рыбы или молока. Поглощенный человеком йод концентрируется в основном в щитовидной железе. Радиоактивные нуклиды йода испускают как  $\beta$ -, так и  $\gamma$ -излучение. *Группа опасности Б.*

### 11.3.3. Стронций и цезий

Продукт деления с большим выходом  $^{90}\text{Sr}$  ( $T_{1/2}=29,1$  года) может попасть в атмосферу вместе с воздухом, выбрасываемым на АЭС, а также оказаться в реках в результате сброса жидких отходов. В организм человека  $^{90}\text{Sr}$  проникает с пищей (молоко, овощи, рыба, мясо, питьевая вода). Хорошо всасывается в легкие. Подобно кальцию  $^{90}\text{Sr}$  откладывается преимущественно в костных тканях, заключающих в себе жизненно важные кроветворные органы. Этим  $^{90}\text{Sr}$  очень опасен для здоровья человека, поскольку биологическое время его выведения из организма равно 18 годам, а дочерним продуктом распада  $^{90}\text{Sr}$  является  $^{90}\text{Y}$  ( $T_{1/2}=2,7$  суток), испускающий  $\beta$ -излучение с максимальной энергией 2,3 МэВ. *Группа опасности Б*.

Радиоактивный цезий ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $T_{1/2}=30$  лет) содержится в малых количествах в газообразных и жидких отходах АЭС. Радиологическое воздействие цезия, как и  $^{90}\text{Sr}$ , на человека связано с проникновением его в человеческий организм вместе с пищей. Для  $^{134}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}=2,7$  суток) и  $^{137}\text{Cs}$  наряду с  $\beta$ -излучением характерным является также гамма-излучение. В живых организмах цезий может в значительной степени замещать калий и подобно последнему распространяться по всему организму в виде высокорастворимых соединений. *Группа опасности В* -  $^{137}\text{Cs}$ . *Группа опасности Г* -  $^{134}\text{Cs}$

### 11.3.4. Нуклиды плутония

Нуклиды плутония могут попасть в атмосферу в виде аэрозолей  $\text{PuO}_2$  или  $\text{PuNO}$ , вместе с газовыми выбросами. Но для АЭС такой выход практически не возможен. Представляет опасность скорее загрязнение плутонием через жидкие отходы АЭС. Наибольшую опасность для здоровья плутоний представляет при вдыхании, накапливаясь в легких. Наибольший интерес представляют следующие нуклиды плутония  $^{238}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}=87,8$  года),  $^{239}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}=24\ 100$  лет),  $^{240}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}=650$  лет),  $^{241}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}=14,4$  года),  $^{242}\text{Pu}$  ( $3,9 \cdot 10^5$  лет). Кроме того, плутоний может попасть в организм при потреблении овощей, молока, мяса, рыбы и питьевой воды; при этом плутоний преимущественно откладывается в костных тканях. Плутоний жесткий  $\alpha$ -излучатель. Из организма выводится плохо.

11.3.5. Радионуклиды церия ( $^{141}\text{Ce}$ ,  $T_{1/2}=32,5$  сут;  $^{144}\text{Ce}$ ,  
 $T_{1/2}=284,3$  сут;)

Могут поступать в организм преимущественно ингаляционным путем, частично через ЖКТ. В организме скапливаются в скелете и печени. *Группа опасности В* -  $^{141}\text{Ce}$ . *Группа опасности Б* -  $^{144}\text{Ce}$ .

11.3.6. Радионуклиды рутения ( $^{103}\text{Ru}$ ,  $T_{1/2}=39,28$  сут;  $^{106}\text{Ru}$ ,  
 $T_{1/2}=368,2$  сут;)

Поступает в организм в основном, ингаляционным путем, задерживается в легких. В ЖКТ усваивается небольшая часть нуклида из пищи, далее он значительно равномерно распределяется по организму медленно.  $\beta, \gamma$  – излучатель. *Группа опасности В* -  $^{103}\text{Ru}$ . *Группа опасности Б* -  $^{106}\text{Ru}$ .

11.3.7. Калий 40  $T_{1/2}=1,3$  млрд.лет.

Природный радионуклид, в основном, присутствует в воде, своим излучением создает естественное внутреннее радиационное облучение. *Группа опасности Г*.

11.3.8. Радон  $T_{1/2}=3,82$  сут

Естественный радионуклид, вносит основной вклад в природную радиоактивность воздуха. В организм человека поступает из воздуха и воды, инертный газ, хорошо растворяется в воде, крови и других жидкостях организма. Мягкий  $\alpha$ -излучатель. Период полувыведения около 1 часа. *Группа опасности Г*.